

Politechnika Wrocławskas
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów

KIERUNEK: Automatyka i Robotyka (AIR)

**PRACA DYPLOMOWA
INŻYNIERSKA**

TYTUŁ PRACY:
Dalmierz ultradźwiękowy z mikrofonami
MEMS

AUTOR:
Krystian Mirek

PROMOTOR:
Dr inż. Bogdan Kreczmer,
Katedra Cybernetyki i Robotyki

Robert Muszyński, Roberto Orozco
Wrocław 2022



Szablon jest dostępny na licencji Creative Commons: *Uznanie autorstwa-Na tych samych warunkach 4.0 Polska*

Utwór udostępniany na licencji Creative Commons: uznanie autorstwa, na tych samych warunkach. Udziela się zezwolenia do kopiowania, rozpowszechniania i/lub modyfikacji treści utworu zgodnie z zasadami w/w licencji opublikowanej przez Creative Commons. Licencja wymaga podania oryginalnego autora utworu, a dystrybucja materiałów pochodnych może odbywać się tylko na tych samych warunkach (nie można zastrzec, w jakikolwiek sposób ograniczyć, ani rozszerzyć praw do nich). Tekst licencji jest dostępny pod adresem: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode.pl>. Podczas redakcji pracy dyplomowej notkę tę można usunąć, licencja dotyczy bowiem zredagowanego opisu, a nie samego latechowego szablonu. Szablon można wykorzystywać bez wzmiankowania o jego autorze.

Spis treści

1 Wstęp	4
2 Cel i założenia	5
3 Przegląd czujników ultradźwiękowych	6
3.1 Dobór odbiornika	6
3.2 Komercyjne rozwiązania	8
4 Analiza problemu	9
4.1 Generowanie i odbieranie sygnału ultradźwiękowego	9
4.2 Określenie kierunku nadejścia odebranego sygnału	9
4.3 Komunikacja	11
5 Specyfikacja realizacji sonaru ultradźwiękowego	12
6 Projekt konstrukcji sonaru oraz protokoły komunikacji	13
6.1 Plan urządzenia	13
6.2 Komunikacja	13
6.2.1 Wybór protokołu	13
6.2.2 Komputer → sonar	14
6.2.3 Sonar → komputer	15
6.3 Konstrukcja układów elektronicznych sonaru	15
6.3.1 Zasilanie	15
6.3.2 Nadajnik	16
6.3.3 Wzmacniacz nadajnika	16
6.3.4 Filtry sygnału audio	17
6.3.5 Progowanie sygnału	18
6.4 Konfiguracja mikrokontrolera	18
6.5 Program	22
7 Realizacja sonaru ultradźwiękowego	24
8 Testy i eksperymenty	28
8.1 Test przetwornika piezoelektrycznego	28
8.2 Test wpływu odległości na sygnał	28
8.3 Pierwsze uruchomienie	29
8.4 Uruchomienie i test wzmacniacza sygnału przetwornika piezoelektrycznego	29
8.5 Test mikrofonów i filtrów	30
9 Podsumowanie i wnioski	31
Literatura	32

Spis treści	3
Spis rysunków	33
A Schematy i noty katalogowe	34

Rozdział 1

Wstęp

Celem rozdziału jest zaprezentowanie podstawowych informacji dotyczących dalmierzy ultradźwiękowych, zasady działania i ich zastosowania w przemyśle, nauce oraz życiu codziennym. Ma on również za zadanie przybliżyć rozwinięcia skrótów powszechnie używanych w tej dziedzinie.

Rozdział 2

Cel i założenia

Popularne dalmierze ultradźwiękowe wykorzystują przetworniki piezoelektryczne jako nadajniki i odbiorniki. Ich średnice wahają się w granicach od 10mm do 20mm. W przypadku prostych dalmierzy, gdy wyznaczana jest tylko odległość do obiektu, ich rozmiar nie jest krytyczny. Jednak w konstrukcjach sonarów ultradźwiękowych, które mają wyznaczyć również kierunek przylotu sygnału, rozmiar ten jest istotny. Jeżeli kierunek przylotu jest wyznaczany w oparciu o przesunięcie fazy odbieranego sygnału, wzajemna odległość odbiorników nie powinna przekraczać pół długości fali emitowanego sygnału. Wykorzystywane powszechnie przetworniki ultradźwiękowe pracują z częstotliwością 40kHz. Pół długości fali akustycznej w powietrzu dla tej częstotliwości to ok. 4,3 mm. Drugim warunkiem stosowalności tego podejścia jest to, aby odbiorniki sygnału można było modelować jako punkty materialne. Od strony technicznej oznacza to, że apertury tych odbiorników powinny być możliwe małe w stosunku do długości fali. Kryteriów tych nie spełniają popularne odbiorniki piezoelektryczne.

Celem niniejszej pracy jest konstrukcja sonaru pozwalającego wyznaczyć odległość do miejsca odbicia sygnału oraz kierunku nadejścia sygnału. Pozwalać ma to tym samym na precyzyjną lokalizację obiektu. Zakłada się, że źródłem sygnału będzie przetwornik piezoelektryczny pracujący z częstotliwością 40 kHz. Wyznaczanie kierunku przylotu ma zostać zrealizowane w oparciu o przesunięcie fazy odbieranego sygnału. Chcąc spełnić opisane powyżej warunki, jako odbiorniki zostaną zastosowane 3 mikrofony analogowe produkowane w technologii MEMS. Sonar powinien udostępniać komunikację poprzez interfejs USB. Dostępna powinna być też możliwość konfiguracji jego pracy, tzn. ilość pobudzeń generujących emitowany sygnał oraz czas opóźnienia przejścia w tryb odbioru. W ramach niniejszej pracy należy też zrealizować podstawowe oprogramowanie dla komputera typu PC, które pozwoli sterować sonarem, wykonać niezbędne pomiary oraz obliczenia. Dysponując tym oprogramowaniem należy przeprowadzić serię eksperymentów, które pozwolą zbadać i zweryfikować podstawowe własności sonaru.

Rozdział 3

Przegląd czujników ultradźwiękowych

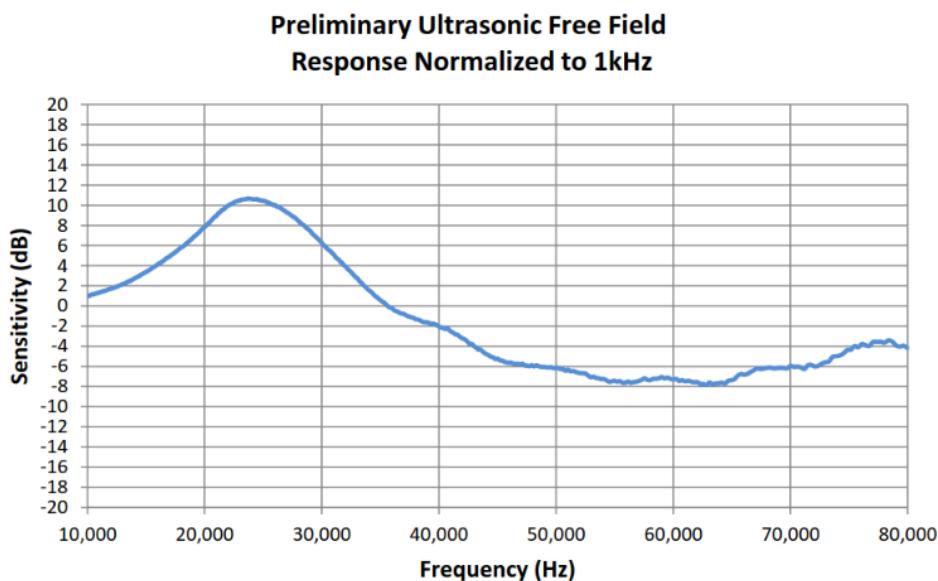
Jednym z najważniejszych części projektu jest układ odbiorczy. Wybrane elementy muszą spełniać szereg cech niezbędnych do poprawnego zrealizowania zadania, w tym rozdziale przedstawiony jest proces doboru elementów mających posłużyć jako odbiornik.

3.1 Dobór odbiornika

Wymagania jakie powinien spełniać odbiornik wynikają bezpośrednio z założeń projektu. Pierwszym z nich jest czułość przetwornika na częstotliwości ultradźwiękowe. Na rysunku 3.1 widzimy przykładowy wykres pasma przenoszenia mikrofonu w odniesieniu do częstotliwości 1 kHz. W przypadku docelowego czujnika istotna jest czułość w wąskim paśmie 40 kHz. Czułość ta nie powinna znaczaco odbiegać poniżej czułości referencyjnej, a w tym przypadku wynosi -2 dB, co jest akceptowalną wartością. Dokładna częstotliwość podyktywana jest głównie standardami branży. Większość przetworników piezoelektrycznych, służących do generowania sygnału ma swój punkt rezonansu w wąskim paśmie bliskim 40 kHz.

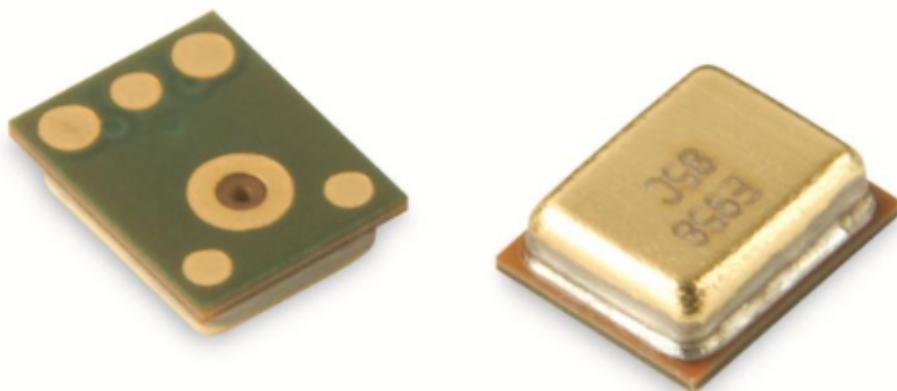
Następnym wymaganiem jest rozmiar. Wynika to z rodzaju pomiaru fali dźwiękowej, każdy z czujników wykrywa przecięcie sygnału z układem odniesienia. Odbiorniki nie powinny być oddalone od siebie bardziej niż połowa długości fali dźwiękowej. Czujniki mogłyby w przeciwnym razie wykrywać przecięcia z różnych okresów fali uniemożliwiając całkowicie obliczenie kąta padania. Długość fali jest zależna od częstotliwości sygnału oraz jego prędkości rozchodzenia się w danym medium. Wyznaczamy ją ze wzoru 3.1 przy czym częstotliwość jest równa 40 kHz, a prędkość rozchodzenia się dźwięku w powietrzu przy temperaturze 15 °C wynosi 340,3 m/s [Wilka]. Połowa długości fali to zatem 4,25 mm i tej wartości nie powinna przekraczać odległość między odbiornikami. Wszystkie czujniki tak małych rozmiarów są produkowane w technologii MEMS.

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{40 \text{kHz}} = 0,0085 \text{m} = 8,5 \text{mm} \quad (3.1)$$



Rysunek 3.1 Pasmo przenoszenia mikrofonu SPU0410LR5H-QB. Źródło: [KNO13]

Kolejnym wymaganiem jest takie umieszczenie otworu ciśnieniowego w obudowie, by skierowany był on wewnątrz laminatu obwodu drukowanego. Taka konstrukcja jak na rysunku 3.2 pozwala na stworzenie płaskiej powierzchni, tylko z otworami ciśnieniowymi czujników. Przekłada się to na mniejsze zakłócenia spowodowane odbiciami fali dźwiękowej od elementów elektronicznych.



Rysunek 3.2 Mikrofon SPU0410LR5H-QB. Źródło: [KNO13]

Ostatecznym wymaganiem była dostępność i przystępność cenowa produktu. Ze względu na tak rygorystyczne oczekiwania wybór zawodził się zaledwie do kilku pozycji. Jedną z nich był mikrofon SPU0410LR5H-QB marki Knowles [kno], który w odpowiedniej ilości został dostarczony przez Promotora.

3.2 Komercyjne rozwiązania

Na rynku znajduje się bardzo dużo ultradźwiękowych czujników odległości, ale względnie niewiele firm oferuje sonary bez ruchomych elementów. Czołowym producentem urządzeń w takiej technologii jest TOPOSENS ze swoim produktem o nazwie ECHO ONE®. Rysunek 3.3, który jest zdjęciem marketingowym produktu, sugeruje, że posiada on ultradźwiękowy nadajnik oraz trzy odbiorniki we wzorze tworzącym kąt prosty.



Rysunek 3.3 TOPOSENS ECHO ONE. Źródło: <https://toposens.com/>

Rozdział 4

Analiza problemu

4.1 Generowanie i odbieranie sygnału ultradźwiękowego

Od nadajnika wymaga się, by był zdolny do emitowania mocnego sygnału tylko dla jednej częstotliwości określonej w rozdziale nr 3. Do tego celu idealnie nadają się przetworniki piezoelektryczne o częstotliwości rezonansowej 40 kHz. W celu zwiększenia wydajności takiego przetwornika, konieczne jest podniesienie jego napięcia pracy. Powinno zostać to zrealizowane za pomocą wzmacniacza prądowego oraz transformatora. Sterownik nadajnika musi pozwalać na wygenerowanie dokładnie określonej ilości impulsów. Mechanizm ten umożliwia urządzeniu wykonywać sekwencje odczytu o różnych parametrach, które mogą mieć wpływ na jakość danych wyjściowych. Ze względu na wybranie mikrofonu o bardzo szerokim paśmie przenoszenia, konieczne jest zastosowanie filtrów pasmowych. Muszą mieć one szczyt skuteczności w zakresie częstotliwości rezonansowej nadajnika, pozwoli to na rozróżnienie sygnału docelowego od innych zakłóceń oraz szumu tła.

4.2 Określenie kierunku nadajścia odebranego sygnału

Cytując publikację Dr Kreczmara [Kre20], do określenia kierunku nadajścia sygnału została użyta metoda polegająca na pomiarze przesunięcia fazowego. Może to być osiągnięte poprzez umieszczone na wspólnej powierzchni odbiorniki. Jeżeli odstępy pomiędzy mikrofonami są mniejsze niż pół długości fali odbieranego sygnału, to do pomiaru wystarczającą konfiguracją są trzy odbiorniki ustawione nie-współliniowo 4.1. W przypadku gdy odległość między odbiornikami jest stosunkowo mała do odległości od wykrywanego obiektu, od którego odbity zostaje sygnał, fala dźwiękowa może być traktowana jako płaska powierzchnia. Zakładając, że t_0, t_1, t_2 to czasy w których ta sama powierzchnia została wykryta odpowiednio przez odbiorniki $R_0, R_1 \text{ i } R_2$, a jednocześnie $t_0 \leq t_1 \text{ i } t_0 \leq t_2$, to odległości odbiorników $R_1 \text{ i } R_2$ od powierzchni w momencie dotarcia do R_0 wynoszą następująco:

$$s_1 = v_a \tau_{01}, s_2 = v_a \tau_{02} \quad (4.1)$$

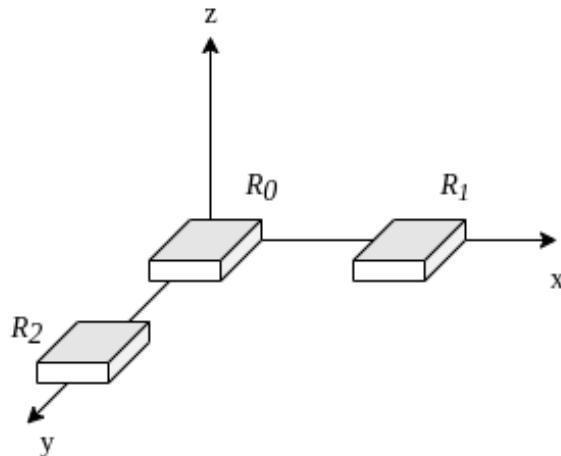
Gdzie v_a jest prędkością fali, $\tau_{01} = t_1 - t_0$ i $\tau_{02} = t_2 - t_0$. Ponieważ w uproszczonym modelu fala dźwiękowa jest płaską powierzchnią musi spełnić równanie

$$ax + by + cz + d = 0. \quad (4.2)$$

Gdzie a, b, c to koordynaty wektorów prostopadłych do powierzchni. Można założyć, że wektor jest znormalizowany i oznaczony jako $n = (n_x, n_y, n_z)$ oraz

$$n_y^2 + n_z^2 + n_z^2 = 1. \quad (4.3)$$

Do wyznaczenia kąta azymutu oraz elewacji obiektu można założyć, że wektor n jest skierowany przeciwnie do kierunku propagacji fali dźwiękowej. W tym przypadku oznacza to $n_x > 0$. Ponieważ wektor n jest znormalizowany, bezwzględna wartość d jest odległością powierzchni od środka układu współrzędnych, który znajduje się w środku odbiornika R_0 4.1. Biorąc pod uwagę poprzednie założenia oraz to, że koordynaty odbiorników R_1 i R_2 to odpowiednio $(0, y_1, z_1)$ i $(0, y_2, z_2)$ daje nam to układ równań:



Rysunek 4.1 rozmieszczenie mikrofonów w przestrzeni trójwymiarowej

$$\begin{cases} n_y y_1 + n_z z_1 = s_1, \\ n_y y_2 + n_z z_2 = s_2, \\ n_y^2 + n_z^2 + n_z^2 = 1. \end{cases} \quad (4.4)$$

Rozwiązaniem tego układu równań jest:

$$n_y = \frac{z_2 s_1 - z_1 s_2}{y_1 z_2 - y_2 z_1}, \quad n_z = \frac{y_1 s_2 - y_2 s_1}{y_1 z_2 - y_2 z_1}, \quad n_x = \sqrt{1 - n_y^2 - n_z^2} \quad (4.5)$$

Mając koordynaty znormalizowanego wektora, kąt azymutu Φ oraz elewację Θ

można obliczyć za pomocą następujących równań

$$\Phi = \arcsin \frac{n_y}{\sqrt{n_y^2 + n_x^2}} = \arcsin \frac{n_y}{\sqrt{1 - n_z^2}}, \quad (4.6)$$

$$\Theta = \arcsin \frac{n_z}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}} = \arcsin \frac{n_z}{\sqrt{1 - n_y^2}}. \quad (4.7)$$

4.3 Komunikacja

Komunikacja komputera typu PC z płytą deweloperską STM32 Nucleo L476rg na której bazowany jest projekt odbędzie się przy pomocy portu szeregowego. Każdy nowoczesny komputer posiada złącze USB, które miało niezwykły wpływ na standaryzacje interfejsów w urządzeniach użytkowych, większość płyt deweloperskich również posiada wbudowane gniazdo USB z portem szeregowym, dlatego też wybór tego rodzaju komunikacji wydaje się wręcz oczywistą decyzją. Tym samym złączem wgrywany jest również program do pamięci mikrokontrolera co jeszcze bardziej upraszcza stanowisko testowe. Dane będą wysyłane w postaci tekstu w formie „pytanie-odpowiedź”, zagwarantuje to większą elastyczność i możliwość zmiany parametrów urządzenia przez użytkownika bez konieczności przeprogramowywania mikrokontrolera. Jednocześnie to rozwiązanie nie spowoduje obniżenia efektywności komunikacji urządzenia z komputerem.

Rozdział 5

Specyfikacja realizacji sonaru ultradźwiękowego

Urządzenie oprócz dostarczania swoich podstawowych funkcji niezbędnych do działania, może również zaoferować pewne udogodnienia w testowaniu oraz obsłudze przez użytkownika końcowego. Takim udogodnieniem jest na pewno zmiana istotnych parametrów sonaru poprzez komunikację szeregową z urządzeniem.

Komendy które przyjmuje urządzenie to:

- Uruchomienie pomiaru – rozpoczyna kompletną sekwencję pomiarową i zwraca wynik z powrotem do urządzenia.
- Zmiana ilości impulsów nadajnika – za parametr przyjmuje wartości od 1 do 10 powtórzeń.
- Zmiana wypełnienia impulsu – wpływa na moc nadajnika, za parametr przyjmuje wartości (0-199), które odpowiadają największemu i najmniejszemu wypełnieniu.
- Zmiana progu wykrywania sygnału – pozwala na regulacje czułości odbiornika, za parametr przyjmuje 12 bitową wartość (0-4095) przetwornika DAC.
- Zmiana czasu odstępu od zakończenia nadawania do rozpoczęcia odbierania, za parametr przyjmuje
- Zmiana czasu końca pomiaru – stanowi o tym kiedy mikrokontroler powinien przerwać odbieranie sygnału, za parametr przyjmuje czas wyrażony w taktach procesora o częstotliwości 80 MHz w zakresie liczby 32 bitowej.

Rozdział 6

Projekt konstrukcji sonaru oraz protokoły komunikacji

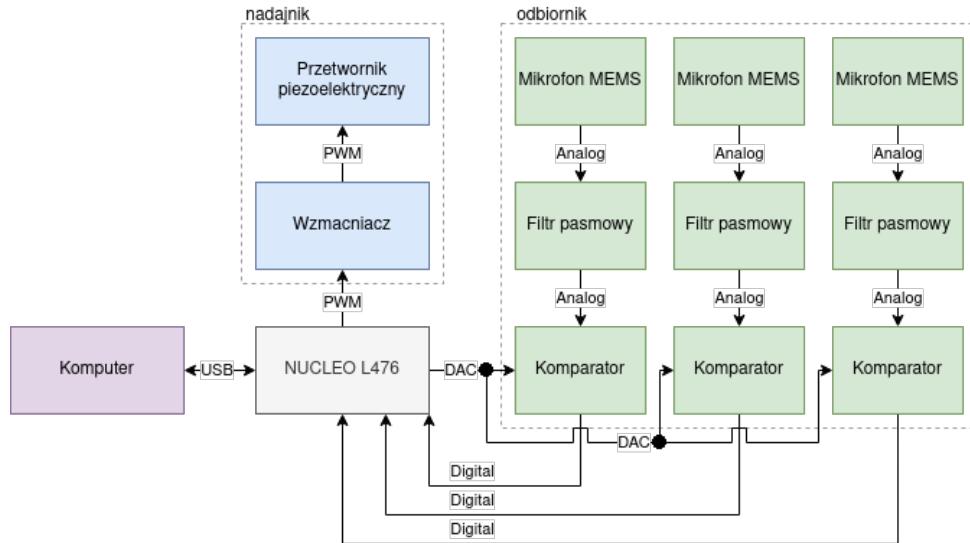
6.1 Plan urządzenia

Założenia konstrukcyjne to przede wszystkim prostota budowy, modularność i skrócenie czasu realizacji. Schemat funkcjonalny na rysunku nr 6.1 obrazuje, w jaki sposób połączone są składowe elementy urządzenia. Płytką deweloperską wysyła określona przez użytkownika liczbę przebiegów sygnału PWM (Pulse Width Modulation), następnie sygnał jest ten wzmacniany do poziomu aż 80 V by uzyskać maksymalną wydajność i trafia na przetwornik piezoelektryczny który generuje falę ultradźwiękową. Fala ta po odbiciu się od obiektu w polu wykrywania sonaru trafia z powrotem do urządzenia a konkretniej do mikrofonów MEMS umieszczo-nych na czole obudowy. Sygnał z mikrofonów jest filtrowany by przepuścić tylko pożądane przez nas częstotliwości bliskie częstotliwości nadajnika, oraz wzmacnia-ny w celu lepszej interpretacji przez dalsze układy. Po przefiltrowaniu, sygnał jest progowany. Mikrokontroler za pomocą przetwornika DAC ustala poziom napięcia, który wyznaczy granicę pomiędzy wysokim a niskim stanem logicznym. To rozróż-nienie jest nam potrzebne do pobudzenia cyfrowego wejścia licznika, zmienność tej wartości pozwala nam również na reagowanie tylko na sygnał o odpowiedniej amplitudzie by móc z powrotem obniżyć próg do miejsca przecięcia się sinusoidy z napięciem odniesienia, gdzie dokładność pomiaru jest największa. Mikroprocesor dzięki wspomnianym wcześniej licznikom odmierza czas między zboczami rosną-cymi sprobowanego już sygnału. Wszystkie pomiary czasów przecięć z trzech od-biorników są wysyłane we wspólnej ramce danych do komputera gdzie za pomocą różnic w tych czasach wyznaczony zostanie dystans obiektu oraz jego odchylenie wzgledem sonaru.

6.2 Komunikacja

6.2.1 Wybór protokołu

Wybrany został protokół UART, ze względu na to, że płytka deweloperska STM32 NUCLEO-L476RG z której skorzystano w projekcie posiada wbudowany konwerter



Rysunek 6.1 Schemat blokowy urządzenia

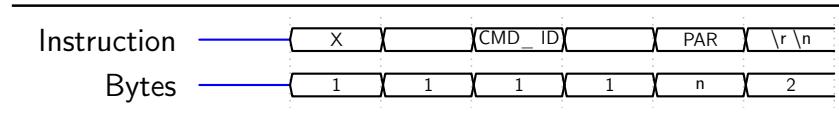
UART → USB, co pozwala na skomunikowanie mikrokontrolera z komputerem bez dodatkowego sprzętu.

W celu uruchomienia sekwencji wykrywania obiektu operator powinien wysłać komendę przykładowo o nazwie "START". Komenda taka posiada swoje ID w formie pojedynczej cyfry, pozwoli to zmniejszyć ilość znaków zamieszczanych w ramce danych. Komunikacja tekstowa przede wszystkim pozwala na weryfikację danych przez standardowy terminal tekstowy. Ramka danych rozpoczęcie się znakiem „X”, pomoże to programowi odfiltrować tylko dane przeznaczone dla niego. „X” został wybrany ze względu na to, że znak ten na pewno nie będzie występował w treści wiadomości w żadnej postaci. Wiadomość startu wraz z opcjonalnymi parametrami takimi jak ilość impulsów do wyemitowania czy próg czułości wykrywania sygnału wysłane są bajt po bajcie do urządzenia. Sonar rozpoznając znak początku ramki przechodzi dalej do odczytywania ID komendy oraz jej parametrów, po odebraniu całej wiadomości program zaczyna sekwencję pomiaru. Następnie urządzenie wysyła do użytkownika odpowiedź, standardowo zaczynając znakiem rozpoznawczym a następnie zwraca numer ID komendy na którą ta wiadomość jest odpowiedzią, status wykonania zadania, w formie kodów błędów, liczba wykrytych przecięć zer, oraz wartości liczników z każdego ze składowych pomiaru. Dane będą przetwarzane przez operacje na obiektach typu string. Pozwoli to na wycięcie odpowiednich wartości ze scalonej ramki wysłanej jako jeden długi ciąg znaków.

6.2.2 Komputer → sonar

Użytkownik systemu może wysłać z komputera instrukcję do wywołania całej sekwencji działania urządzenia. Ramka danych zaczyna się znakiem, który nie będzie nigdy występował w treści wiadomości, ułatwi to rozpoznanie wiadomości, następnie musi zostać podany numer komendy informujący sonar jaką czynność powinien wykonać oraz parametr określający warunki tej czynności. Informacje te zostały oddzielone znakiem spacji, a wiadomość zakończona znakiem końca lini i

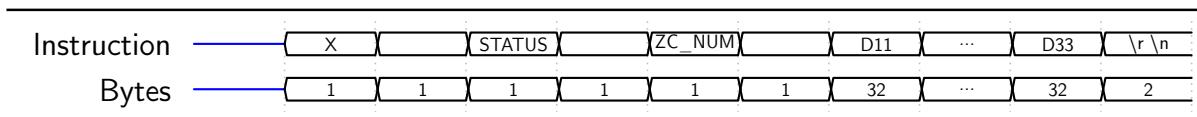
powrotu karetki. Lista dostępnych komend została szerzej opisana w rozdziale 5.



Rysunek 6.2 Ramka danych przychodzących

6.2.3 Sonar → komputer

Sonar w odpowiedzi na instrukcję wysyła ramkę danych która również zaczyna się znakiem specjalnym. Tym razem jest to litera Y w celu rozróżnienia wiadomości wychodzących i przychodzących. Następnie podawany jest status wykonania, liczba wykrytych przecięć sygnału z układem odniesienia oraz czasy wykrytych przecięć ze wszystkich odbiorników. Podobnie jak w ramce z komendami przychodzącymi, wszystkie dane oddzielone są znakiem spacji a ramka zakończona znakiem końca linii oraz powrotem karetki. Dodatkowo podczas pracy urządzenie zwraca informacje diagnostyczne o wykonanych działaniach, błędach i ostrzeżeniach.



Rysunek 6.3 Ramka danych wychodzących

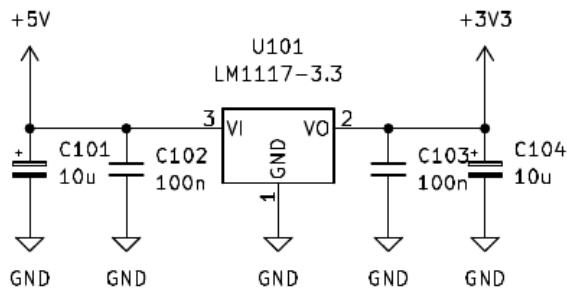
6.3 Konstrukcja układów elektronicznych sonaru

Projekt bazuje na autorskiej płytce z obwodem drukowanym, który został zaprojektowany przy pomocy otwartoźródłowego narzędzia do projektowania elektroniki KiCad [KiC]. Całe urządzenie składa się z płytki deweloperskiej oraz zaprojektowanego na cele pracy dyplomowej PCB (ang. Printed Circuit Board), które jest połączone do Nucleo w formie nakładki (ang. shield) poprzez listwy kołkowe. Całą elektroniczną część urządzenia można podzielić na kilka bloków, ze względu na spełniane funkcje. Do bloków tych zaliczamy blok sekcji zasilania, blok nadawczy oraz blok odbiorczy. Ten ostatni zawiera zestaw filtrów sygnału odbieranego oraz komparatory progujące.

6.3.1 Zasilanie

Całe urządzenie zasilane jest z portu USB komputera, które jednocześnie służy do komunikacji. Przewód jest podłączony bezpośrednio do płytki deweloperskiej Nucleo, gdyż posiada ona już wbudowane złącze. Mimo, że płytka deweloperska posiada wyprowadzenia zarówno 5 V jak i 3,3 V, postanowiłem zaimplementować układ stabilizatora liniowego LM1117 obniżającego napięcie do 3,3 V w celu lepszej izolacji zasilania układów analogowych od cyfrowych co powinno przełożyć się na mniejsze

zakłócenia. Blisko jego wyprowadzeń zostały również umieszczone kondensatory konieczne do poprawnej stabilizacji, zgodnie z zaleceniami w nocy katalogowej [Tex]



Rysunek 6.4 Stabilizator napięcia

6.3.2 Nadajnik

Rolę nadajnika pełni przetwornik piezoelektryczny BPU-1640T0AH12 o średnicy 16 mm i częstotliwości rezonansowej 40 kHz, która to jest poza spektrum słyszalnych dla człowieka częstotliwości wynoszącym 16-20 000 Hz [Wikb].

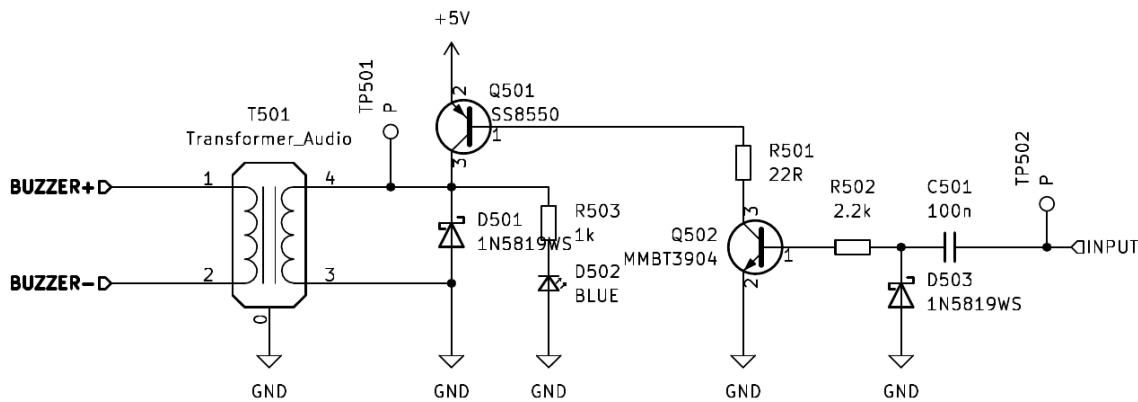


Rysunek 6.5 Nadajnik piezoelektryczny. Źródło: <https://www.manorshi.com/>

6.3.3 Wzmacniacz nadajnika

W celu uzyskania mocnego sygnału ultradźwiękowego z przetwornika piezoelektrycznego zaprojektowano układ wzmacniający z transformatorem. Sygnał nadający częstotliwość wysyłany jest z mikroprocesora, następnie jest wzmacniany parą tranzystorów SS8550 oraz MMBT3904, razem tworzących układ Darlingtona, który zapewnia duże wzmacnienie prądowe sygnału i zachowuje krótkie czasy przełączania charakterystyczne dla tranzystorów bipolarnych. Transformator w tym układzie służy do podniesienia napięcia które trafia na przetwornik, docelowo jest to nawet szczytowo 80 V co sprawia, że sygnał jest bardzo mocny. Układ posiada również zabezpieczenie przed zbyt długim czasem otwarcia tranzystora, sygnał jest przepuszczany przez kondensator C501 6.6, co sprawia, że tylko szybkozmienne przebiegi są

w stanie dotrzeć na bazę tranzystora Q502. Zbyt długa ekspozycja transformatora na przepływ prądu mogłaby go narazić na przegrzanie. Ze względu na indukcyjny charakter uzwojeń transformatora podczas szybkiej zmiany generowanego pola magnetycznego następuje konwersja tej energii do postaci prądu zwrotnego wyindukowanego na tej cewce. Aby uchronić się przed niepożądany działaniem tego zjawiska, równolegle z uzwojeniem pierwotnym sprężona jest dioda Schottkiego 1N5819WS, która pozwala zniwelować ten prąd. Dodatkowo jako element ułatwiający pracę nad urządzeniem, dodany został LED, który emisuje światło w trakcie przepływu prądu przez transformator.



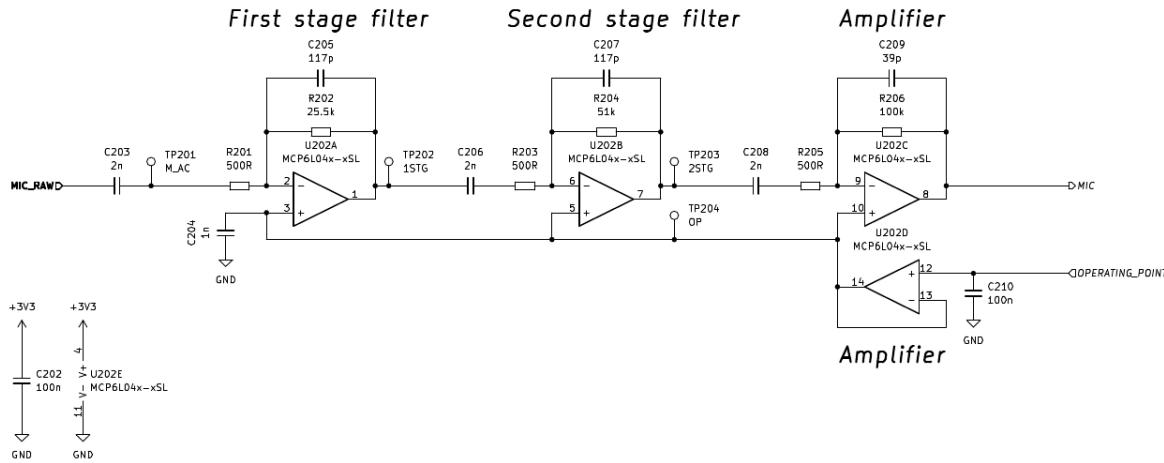
Rysunek 6.6 Wzmacniacz sygnału nadajnika piezoelektrycznego

6.3.4 Filtry sygnału audio

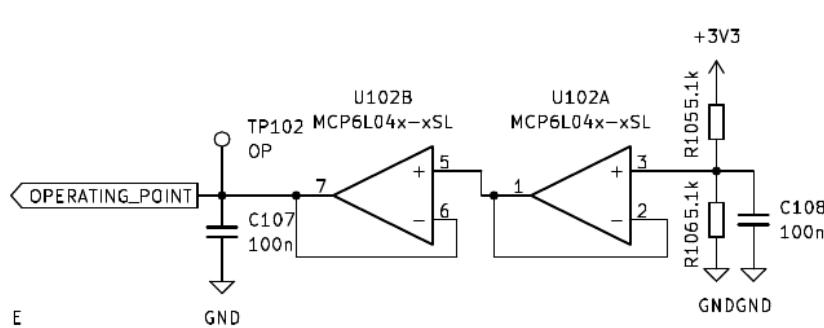
Przyjęto, że rolę odbiorników będą pełnić trzy dookółne mikrofony MEMS, które cechują się względnie liniową charakterystyką przenoszenia pasma. Dlatego też konieczne jest zastosowanie dla każdego z nich zestawu filtrów pasmowych, które przepuszcza nam tylko i wyłącznie częstotliwości bliskie częstotliwości sygnału jaki generuje przetwornik piezoelektryczny, a zablokują wszystkie niepożądane. Po jedynym stopień filtra, dawałby na wyjściu zbyt niski zakres poziomu napięć, z tego powodu sygnał przechodzi przez 3 stopnie wzmacniaczy operacyjnych MCP6L04. Takie rozwiązanie zarówno filtruje sygnał i wzmacnia go.

Zazwyczaj układy analogowe oparte o wzmacniacze operacyjne zasilane są napięciem symetrycznym a sygnał przemienny oscyluje wokół potencjału masy. W tym wypadku ze względu na zakres napięciowy wejść mikroprocesora do zasilania wzmacniaczy operacyjnych zostało użyte pojedyncze napięcie 3,3 V zamiast symetrycznego co oznacza, że chcąc uzyskać napięcie odniesienia w połowie zakresu zasilania należy ustalić je na poziomie 1,65 V. Tę wartość ustala dzielnik napięcia z dwóch identycznych rezystorów, a wzmacniacz operacyjny zwiększa wydajność prądową takiego źródła.

zaktualizowac
rysunek



Rysunek 6.7 Zestaw filtrów dla sygnału z mikrofonów



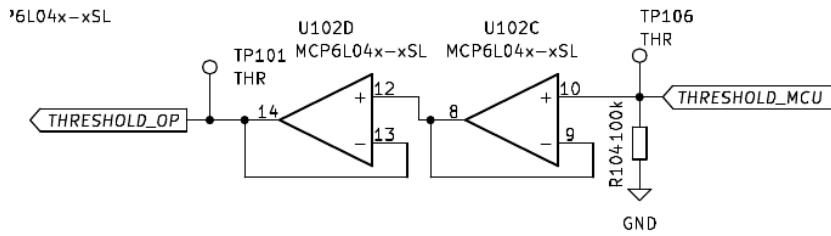
Rysunek 6.8 Wzmacniacz prądowy napięcia odniesienia

6.3.5 Progowanie sygnału

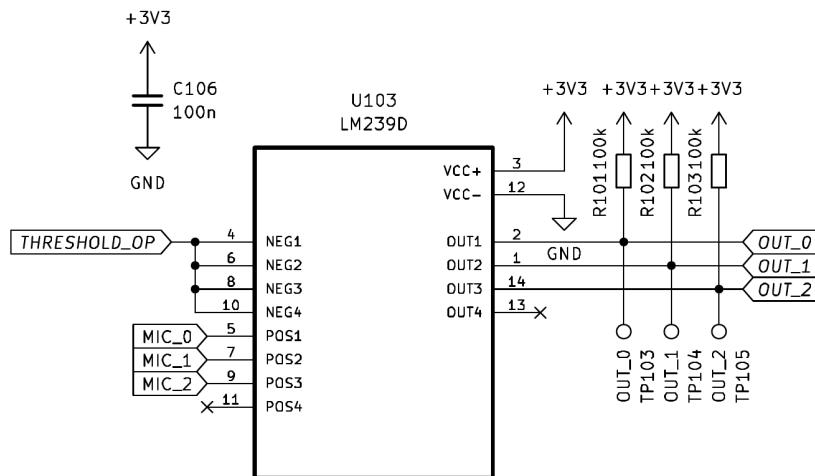
Wejścia licznika reagują na zbocza sygnału cyfrowego, co oznacza, że analogowy sygnał z wyjścia filtra musi zostać przetworzony na stany logiczne. Dokładna wartość napięcia nie jest potrzebna. Istotne są punkty przecięcia się sinusoidy z osią przebiegu. Takie zadanie idealnie spełnia komparator LM239D 6.10, próg od którego sygnał ma interpretować jako wysoki stan jest podawany w formie napięcia z przetwornika DAC mikrokontrolera dodatkowo wzmacnionego wzmacniaczem operacyjnym MCP6L04 6.9. Pozwala to na reagowanie tylko na falę dźwiękową o wystarczająco dużej amplitudzie, a po wykryciu mocnego sygnału wrócić z powrotem do poziomu napięcia odniesienia sygnału gdzie pomiar jest najdokładniejszy.

6.4 Konfiguracja mikrokontrolera

Mikrokontroler użyty w projekcie to STM32L476 został on wybrany ze względu na odpowiednią liczbę liczników, przetworników i interfejsów komunikacji. Jego konfiguracja została przeprowadzona w programie STM32CUBEMX od firmy ST. Graficzny interfejs pozwala w łatwy sposób zmienić ustawienia peryferiów, takto-



Rysunek 6.9 Wzmacniacz wartości progowej



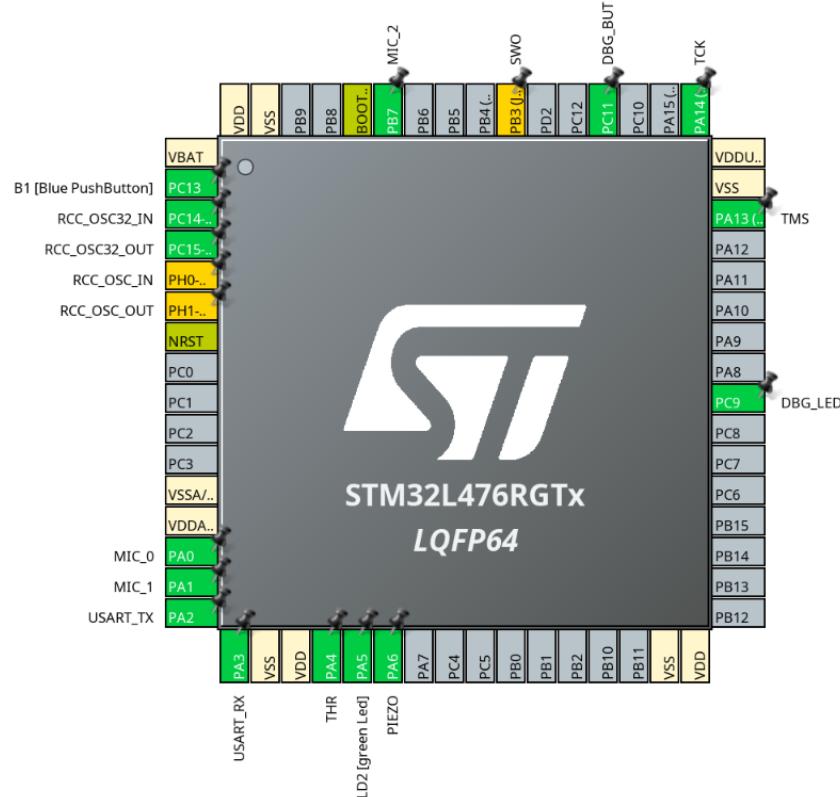
Rysunek 6.10 Czterokanałowy komparator

wania zegarów systemowych czy nazwy zmiennych pomocniczych przydatnych na etapie programowania. Gotowa konfiguracja wejść i wyjść została przedstawiona na rysunku nr 6.11, gdzie przyjęto następujące oznaczenia:

- MIC_0 – pin do pomiaru sygnału z mikrofonu nr 0
- MIC_1 – pin do pomiaru sygnału z mikrofonu nr 1
- MIC_2 – pin do pomiaru sygnału z mikrofonu nr 2
- THR – pin generujący napięcie progowania(thereshold) dla komparatora zewnętrznego
- PIEZO – pin sterujący przetwornikiem piezoelektrycznym
- DBG_LED – pin obsługujący diodę diagnostyczną
- DBG_BUT – pin obsługujący przycisk diagnostyczny

Piny odpowiedzialne za pomiary sygnału z mikrofonów zostały skonfigurowane jako wejścia 32 bitowego licznika TIM2 na osobnych kanałach. Została wykorzystana funkcja input capture, która wywołuje przerwanie za każdym razem jak wykryje zbocze rosnące lub opadające sygnału. W przerwaniu zaczytywana jest wartość licznika i przekazywana do bufora wiadomości. Wyjście o nazwie THR zostało skonfigurowane jako przetwornik DAC, jego celem jest wygenerowanie napięcia, które

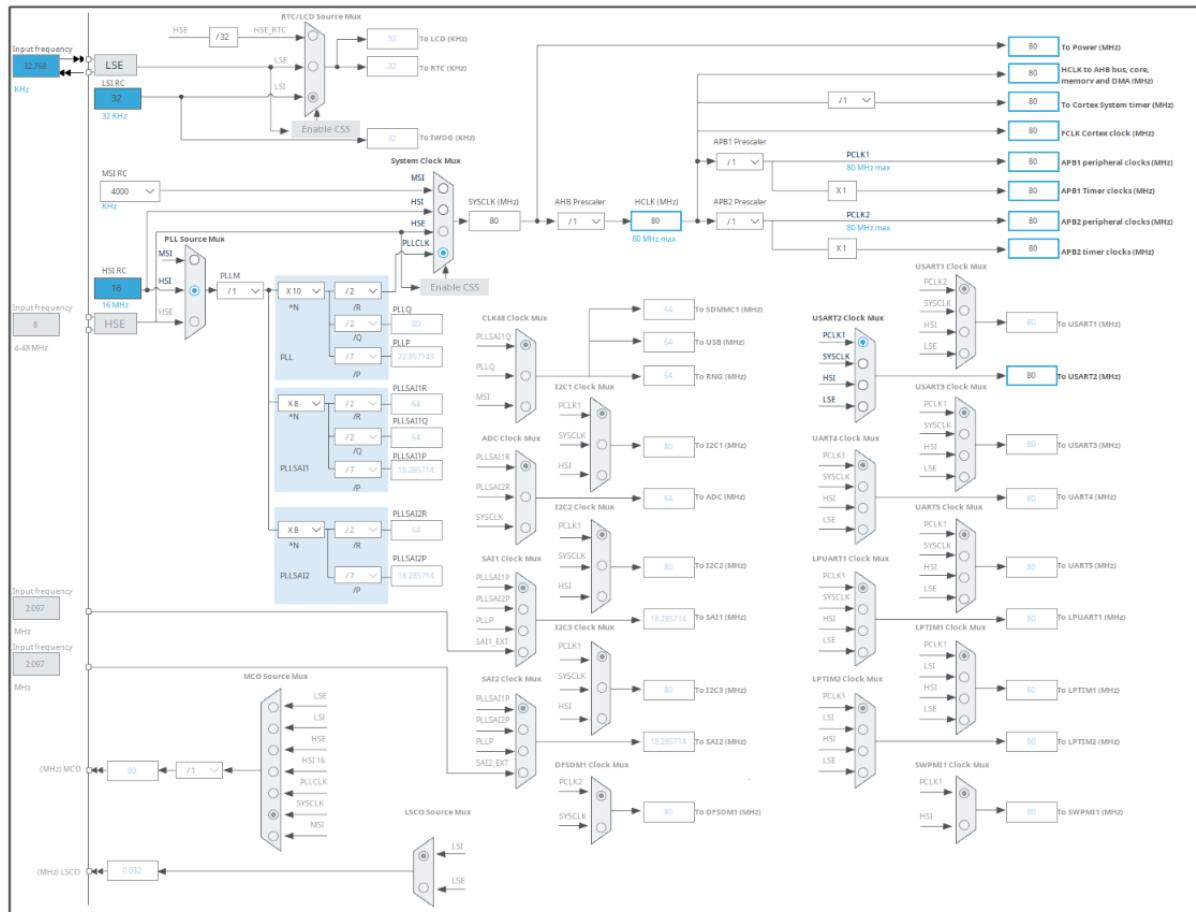
zaktualizowac
rysunek
procka



Rysunek 6.11 Konfiguracja pinów mikrokontrolera

jest programem wykrycia sygnału dla komparatora [6.10](#). Wartość ta podlega zmianie w trakcie pracy urządzenia, przez co użytkownik może dopasować czułość detektora, albo zwiększyć dokładność w trakcie trwania samego pomiaru. Przetwornik piezoelektryczny sterowany jest sygnałem PWM, licznik TIM16 został skonfigurowany do pracy w PWM Generation z dodatkową opcją One Pulse Mode. Oznacza to, że licznik wykona dokładnie jeden okres sygnału o zadanych parametrach. W celu powtórzenia impulsu wyznaczoną przez użytkownika liczbę razy wykorzystany został rejestr RCR (Repetition Counter). Elementy do debugowania zostały skonfigurowane jako zwykłe wyjście dla diody, oraz zwykłe wejście dla przycisku.

Taktowanie mikroprocesora zostało ustawiane na zalecaną maksymalną wartość 80 MHz. Jak widać na rysunku nr [6.12](#) z tej wartości korzystają również wszystkie użyte w projekcie peryferia. Co ma znaczenie podczas obliczania np częstotliwości sygnału PWM czy konwertowaniu wartości licznika na czas rzeczywisty.



Rysunek 6.12 Konfiguracja zegarów mikrokontrolera

```
1 void HAL_TIM_IC_CaptureCallback(TIM_HandleTypeDef *htim)
2 {
3     switch (htim->Channel)
4     {
5         case HAL_TIM_ACTIVE_CHANNEL_1:
6             active_channel = 1 - 1;
7             zero_cross[0]++;
8             set_timing_array(1, zero_cross[0], HAL_TIM_ReadCapturedValue(htim, TIM_CHANNEL_1));
9             break;
10        case HAL_TIM_ACTIVE_CHANNEL_2:
11            active_channel = 2 - 1;
12            zero_cross[1]++;
13            set_timing_array(1, zero_cross[1], HAL_TIM_ReadCapturedValue(htim, TIM_CHANNEL_2));
14            break;
15        case HAL_TIM_ACTIVE_CHANNEL_3:
16            active_channel = 3 - 1;
17            zero_cross[2]++;
18            set_timing_array(1, zero_cross[2], HAL_TIM_ReadCapturedValue(htim, TIM_CHANNEL_3));
19            break;
20        default:
21            break;
22    }
23 }
```

Wydruk 6.1 Odbieranie przecięć przez zero

6.5 Program

Program w całości został napisany w języku C, korzystając z powłoki abstrakcji HAL od ST electronics. Większość funkcjonalności programu udało się zrealizować na przerwaniach systemowych oraz licznikach sprzętowych w celu maksymalizacji wydajności wykonywania operacji. Pomiar przecięć sygnału z układem odniesienia jest dokonywany poprzez czytanie wartości licznika w momencie wywołania przerwania zmianą stanu na jego wejściu. Na wydruku 6.1 przedstawiony został callback odpowiadający za pomiar czasów zmiany stanu.

Wszystkie znaki przychodzące za pomocą peryferium UART są zapisywane w buforze, lecz dopiero kiedy napotkany zostanie znak końca linii, wykonywana jest operacja sprawdzenia poprawności danych w ciągu znaków. Odbieranie wiadomości w formie tekstowej opiera się na funkcjach operujących na zmiennych typu *string*. Funkcja *sscanf* widoczna na wydruku 6.2 wyciąga z tekstopożego typu danych liczby i konwertuje je na typ danych liczb całkowitych *int*. W ten sposób otrzymane dane przekazywane są do funkcji *ExecCmd*, która wywołuje podaną w parametrach komendę z parametrami. W celach diagnostycznych umieszczone zostały również linie kodu odpowiedzialne za wyświetlanie buforu po każdej odebranej wiadomości oraz komunikat błędu, jeżeli wiadomość ta nie spełnia kryteriów przyjętych podczas projektowania systemu komunikacji.

Po minięciu czasu zakończenia pomiaru, przerwanie wywołuje blok 6.3 odpowiedzialny za odesłanie wyników do komputera. Za pomocą funkcji *printf* dane wysyłane pojedynczo, a pakiet danychkończony jest znakiem końca linii po wysłaniu wszystkich danych zapisanych w buforze.

```
1 void MsgHandler()
2 {
3     if (get_ready_to_send())
4         SendResults();
5
6     if (serial_available())
7     {
8         uint8_t c = serial_read();
9         buff[buf_size] = c;
10        buf_size++;
11        if (c == '\n')
12        {
13            printf("Captured MSG: %s", buff);
14            if (buff[0] == 'X' && sscanf(buff + 2, "%d %d", &cmdID, &param) == 2)
15            {
16                printf("MSG CmdId: %d, Param: %d \r\n", cmdID, param);
17                ExecCmd(cmdID, param);
18            }
19            else
20                printf("ERROR: MSG INVALID\r\n");
21            memset(buff, 0, sizeof buff);
22            buf_size = 0;
23        }
24    }
25 }
```

Wydruk 6.2 Funkcja zarządzająca wiadomościami przychodząymi i wychodzącymi

```
1 void SendResults()
2 {
3     printf("Y 1 %c ", get_zero_cross(0));
4
5     for (uint8_t i = 0; i < CHANNELS_NUM; i++)
6     {
7         for (uint8_t j = 0; j < get_pulse_count(); i++)
8         {
9             printf("%ld ", get_timing_array(i, j));
10            }
11        }
12    printf("\r\n");
13 }
```

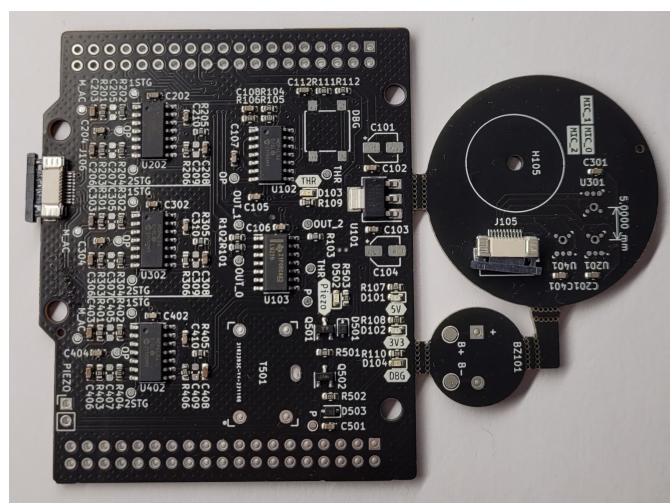
Wydruk 6.3 Funkcja tworząca ramkę wiadomości wychodzącej

Rozdział 7

Realizacja sonaru ultradźwiękowego

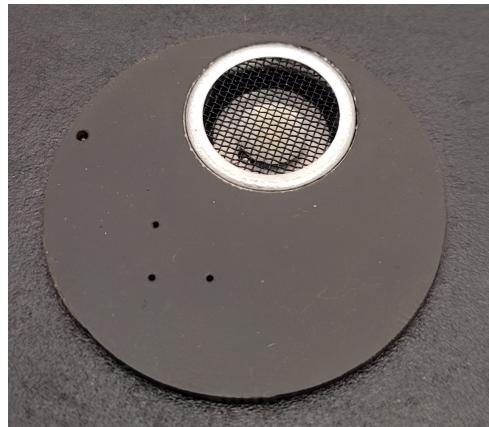
Obwód drukowany został zamówiony w firmie JLCPCB. Zagraniczni producenci PCB oferują nieporównywalnie lepszą jakość wykonania niż pozwalają na to domowe sposoby takie jak termotransfer. Czasy realizacji w odpowiedniej opcji transportowej potrafią się ograniczyć nawet do jednego tygodnia. Przekłada się to na popularność głównie chińskich dostawców wśród zarówno amatorów elektroniki jak i profesjonalistów. Kolejnym czynnikiem wpływającym na decyzję wyboru producenta jest cena. Dzięki optymalizacji procesów produkcyjnych podstawową płytę dwuwarstwową można zamówić już nawet za 2\$. JLCPCB również posiada w swojej ofercie montaż maszynowy elementów elektronicznych. Wymaga to dostarczenia odpowiednich plików produkcyjnych i listy materiałowej. Koszt montażu i komponentów jest doliczany do rachunku. Pozwala to zaoszczędzić bardzo dużo czasu podczas całego procesu wdrażania urządzenia.

W celu obniżenia kosztów produkcyjnych, wszystkie płytki składowe projektu zostały zawarte w jednym arkuszu tak jak widać na rysunku 7.1. Producent traktuje to jako jedno zlecenie, oraz nie ma potrzeby wielokrotnego konfigurowania maszyny pod montaż elementów. Łączenia miedzy modułami zostały zaprojektowane tak, aby nie stwarzały ryzyka oderwania podczas produkcji ale jednocześnie tak by dało się je celowo łatwo rozdzielić ręcznie.



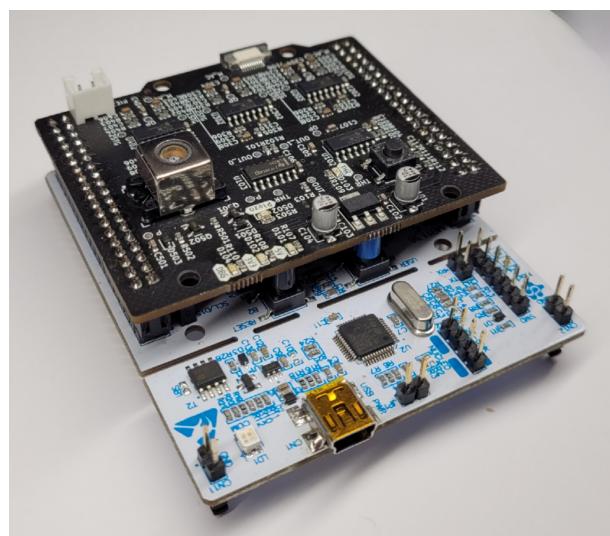
Rysunek 7.1 PCB

Moduł z przetwornikami jest okrągłą płytka widoczną na rysunku 7.2 na której mieści się przetwornik umieszczony w dużym otworze, mikrofony których układ sugerują trzy małe otwory, pełnią one funkcję kanału ciśnieniowego, to dzięki nim dźwięk dostaje się do mikrofonów będących po drugiej stronie płytki. Z głównym modułem łączy się przez taśmę FPC o rastrze 0,5 mm. Celem tworzenia osobnego modułu dla przetworników dźwięku jest konieczność umiejscowienia tych elementów na zewnątrz obudowy oraz skierowanych w kierunku pracy urządzenia.



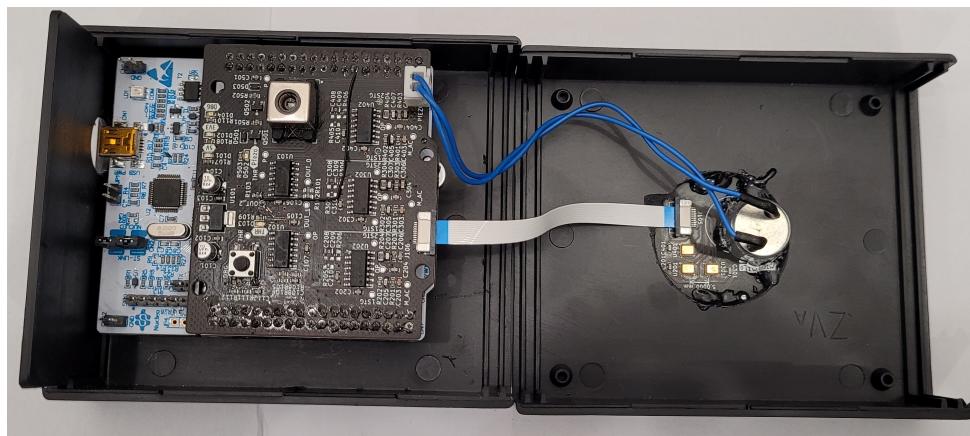
Rysunek 7.2 Moduł nadawczo-odbiorczy

Główny moduł został zaprojektowany na wzór popularnych w prototypowaniu nakładek na płytki deweloperskie. Tak jak widać na zdjęciu 7.3 obwód drukowany jest nałożony bezpośrednio na taką płytke, bez konieczności użycia przewodów. Moduł łączy się z Nucleo poprzez listwy kołkowe na które wyrowadzone zostały prawie wszystkie piny mikrokontrolera STM32L476, oraz dodatkowo napięcia zasilające całą płytke. Umieszczono tutaj cały układ wzmacniacza nadajnika oraz filtry, wzmacniacze i komparatory należące do bloku odbiorczego. Na krawędzi umieszczone są złącza służące do podłączenia nadajnika i odbiorników urządzenia.



Rysunek 7.3 Nakładka na Nucleo

Całe urządzenie zostało umieszczone w plastikowej obudowie marki KRADEX.[cite](#) Dostępne są one w wielu wariantach wymiarów, kształtów oraz materiałów. Ułatwiało to znalezienie modelu, który będzie najbardziej odpowiedni do tego zadania. Materiał obudowy został wybrany ze względu na łatwość obróbki, ze względu na konieczność wywiercenia dodatkowych otworów na moduł nadawczo-odbiorczy bądź na port USB widocznych na zdjęciu 7.4. Do montażu płytki deweloperskiej wykorzystane zostały przeznaczone do tego otwory montażowe na laminacie. Za pomocą dystansów płytka została przykręcona do obudowy, a moduł nadawczo-odbiorczy został zamocowany do górnej jej części za pomocą kleju. Inne sposoby mocowania tego modułu takie jak śruby, mogłyby zakłócić pomiar poprzez odbicie od ich powierzchni w pobliżu mikrofonów.



Rysunek 7.4 Skończony projekt w otwartej obudowie

W sposób ukazany na zdjęciu 7.5 prezentuje się gotowe urządzenie. Jak widać, czoło urządzenia jest możliwie płaskie by jak najmniej zakłócać pomiar. Sonar względem użytkownika udostępnia tylko złącze mini USB w celu komunikacji i zasilania urządzenia. Cała interakcja odbywa się za pomocą oprogramowania.



Rysunek 7.5 Skończony projekt

Na zrzucie ekranu 7.6 przedstawiona została przykładowa komunikacja z urządzeniem.

dzeniem. Pierwsza odebrana wiadomość to komenda "4" z parametrem "2800" oznacza to, że próg wykrywania impulsu został zmieniony na wartość 2800 jednostek, o czym program poinformował w wiadomości będącej odpowiedzią na tą komendę. Następnym przechwyconym ciągiem znaków jest "X 0 0" co przekłada się na komendę numer 0 która nie przyjmuje żadnych parametrów, dlatego też w jego polu również przekazane zostało zero. Komenda ta oznacza polecenie uruchomienia sekwenacji pomiarowej sonaru. W odpowiedzi na pomiar powinien być zwrócony wynik pomiaru również w formie tekstowej.

```
Captured MSG: X 4 '2800
MSG CmdId: 4, Param: 2800
THR changed to 2800
Captured MSG: X 0 0
MSG CmdId: 0, Param: 0
Measure started
```

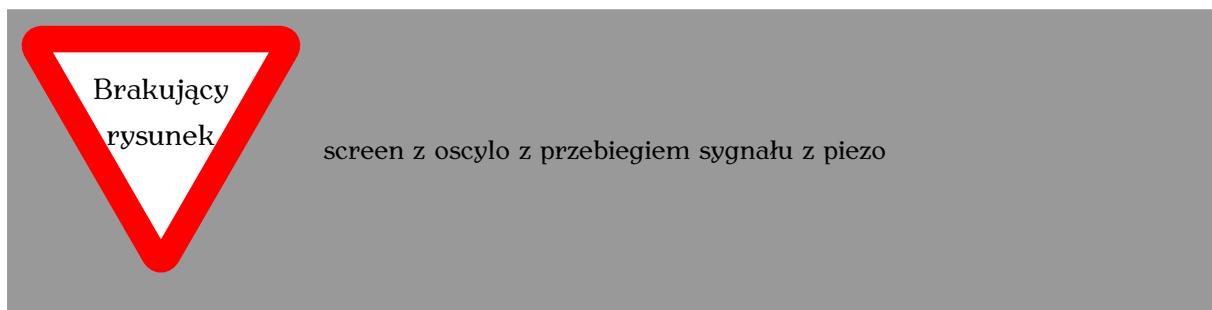
Rysunek 7.6 Widok terminala podczas komunikacji z urządzeniem

Rozdział 8

Testy i eksperymenty

8.1 Test przetwornika piezoelektrycznego

Pierwszym testem był test przetwornika, który jest nadajnikiem sygnału. Zasilono go bezpośrednio z generatora wbudowanego w oscyloskop, parametry zadane to sygnał sinusoidalny o napięciu 5 V *peak-to-peak* czyli wartości szczytowej. Elementem odbiorczym był inny przetwornik piezoelektryczny służący tylko do testów, został on umieszczony w odległości 10 cm od nadajnika. Jego częstotliwość rezonansowa również wynosiła 40 kHz. Po podłączeniu sondy oscyloskopu do odbiornika ukazał się bardzo wyraźny sygnał w kształcie sinusoidy ustawionej na nadajniku. Dźwięki otoczenia miały bardzo znikomy wpływ na zakłócenia, stanowiąc niewielki procent amplitudy. Zmiana częstotliwości o chociażby 1 kHz wiązała się kilkudziesięciokrotnym spadkiem mocy sygnału, co potwierdzało dane z noty katalogowej elementu piezoelektrycznego.

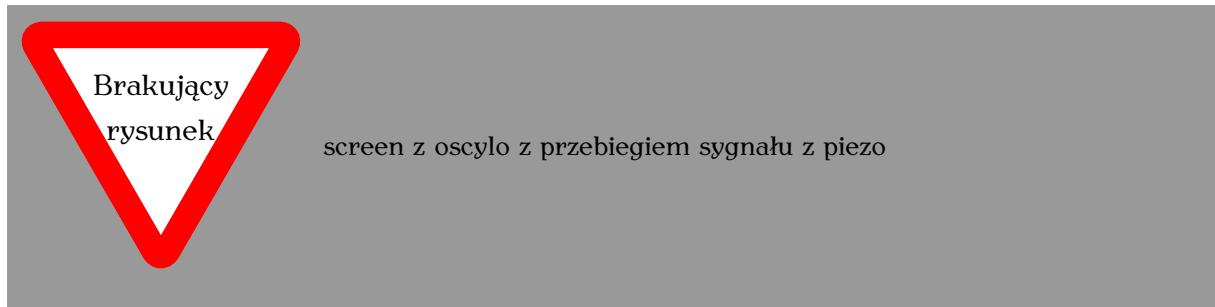


Rysunek 8.1 Przebieg sygnału odebrany innym przetwornikiem piezoelektrycznym

8.2 Test wpływu odległości na sygnał

Z identycznym stanowiskiem pomiarowym co sekcję wyżej sprawdzono wpływ odległości czujników na moc i przesunięcie fazy sygnału. Zmieniając odległość nadajnika od odbiornika dało się w czasie rzeczywistym wyraźnie zauważać przesuwanie się fazy sygnału jak i jego amplitudę.

zdjęcie z oscylo z przesuniętym sygnałem i kilka testów na różne odległości



Rysunek 8.2 Przebieg sygnału odebrany innym przetwornikiem piezoelektrycznym, wpływ na odległość

8.3 Pierwsze uruchomienie

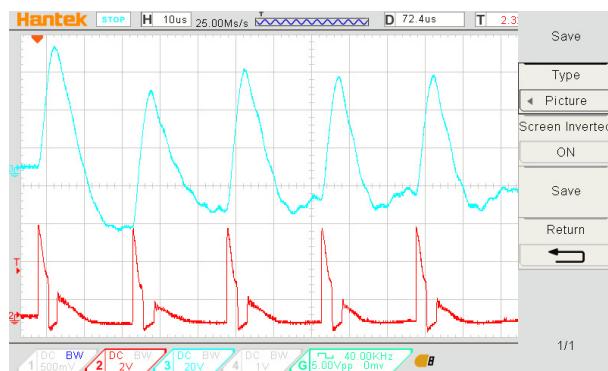
PCB z przylutowanymi elementami zostało podłączone do zasilacza laboratoryjnego dostarczającego 5 V i ograniczeniem prądowym ustawionym na 100 mA. Pierwsze uruchomienie sterownika sonaru ujawniło drobny błąd projektowy, wszystkie diody elektroluminoescentne zostały przylutowane w złej polaryzacji. Szybka zmiana ustawień diod i następne uruchomienie, nie pokazywało oznak większych błędów. Pobór prądu wyniósł, a temperatura elementów na płytce nie odstawała od temperatury pokojowej.

???

podać ile prądu ciągnie

8.4 Uruchomienie i test wzmacniacza sygnału przetwornika piezoelektrycznego

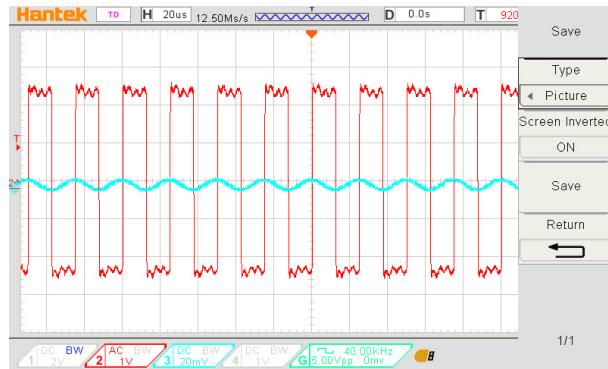
Wzmacniacz nadajnika zachował się zgodnie z założeniami projektowymi, na wyjściu otrzymane zostało 80 V peak-to-peak.



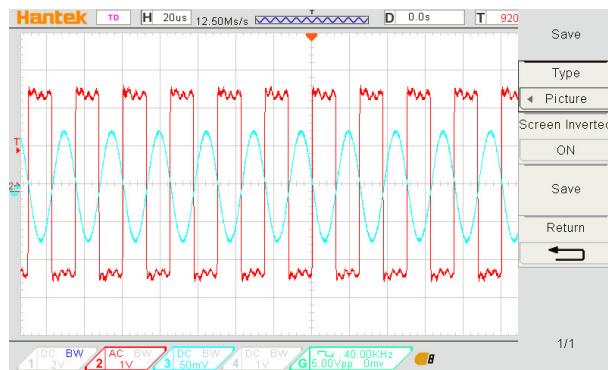
Rysunek 8.3 Wyjście transformatora z podłączonym przetwornikiem piezoelektrycznym

8.5 Test mikrofonów i filtrów

Test miał na celu sprawdzenie jaki poziom sygnału dostarczają same mikrofony oraz na



Rysunek 8.4 Przebieg sygnału odebranego bezpośrednio przez mikrofon MEMS



Rysunek 8.5 Przebieg sygnału odebranego bezpośrednio przez mikrofon MEMS

Rozdział 9

Podsumowanie i wnioski

Ten rozdział pisze się jako przedostatni. Ostatnim jest "Wstęp"

Literatura

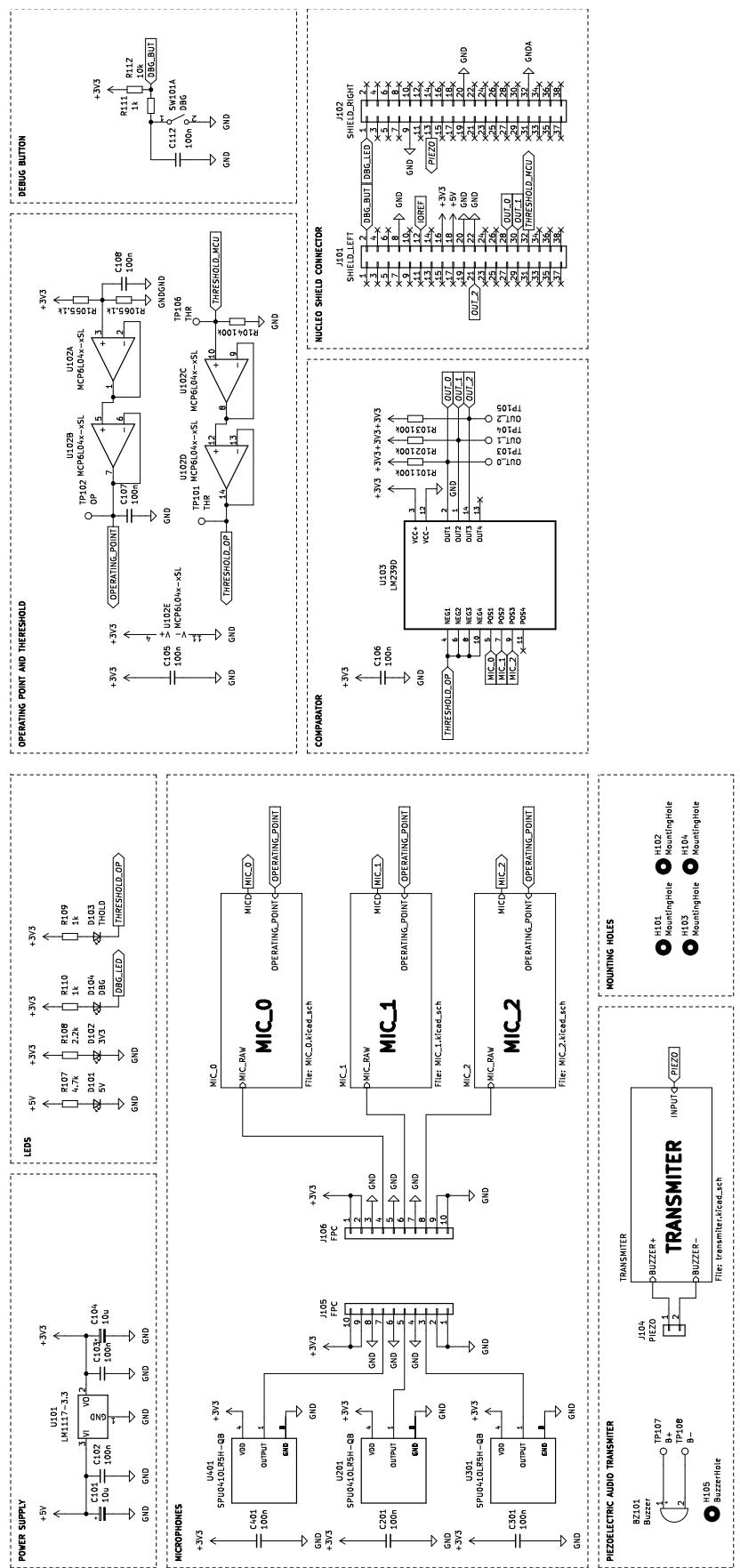
- [KiC] kicad. <https://www.kicad.org/>.
- [kno] Knowles corporation (nyse: Kn) is a market leader and global provider of advanced micro-acoustic, audio processing, and precision device solutions, serving the ... <https://www.knowles.com/>.
- [KNO13] KNOWLES, *Zero-Height SiSonic™Microphone*, 3 2013. Rev. H.
- [Kre20] Bogdan Kreczmer, Estimation of azimuth and elevation angles of ultrasonic signal arrival by indirect phase determination. W: Roman Szewczyk, Cezary Zieliński, Małgorzata Kaliczyńska, redaktorzy, *Automation 2020: Towards Industry of the Future*, strony 359–367, Cham, 2020. Springer International Publishing.
- [Tex] Texas Instruments, *LM1117 800-mA, Low-Dropout Linear Regulator*. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1117.pdf?ts=1671400004705&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F.
- [Wilka] Wikipedia. Prędkość dźwięku. https://pl.wikipedia.org/wiki/Pr%C4%99dko%C5%9B%C4%87_d%C5%BAwi%C4%99ku.
- [Wikb] Wikipedia. Słuch. <https://pl.wikipedia.org/wiki/S%C5%82uch>.

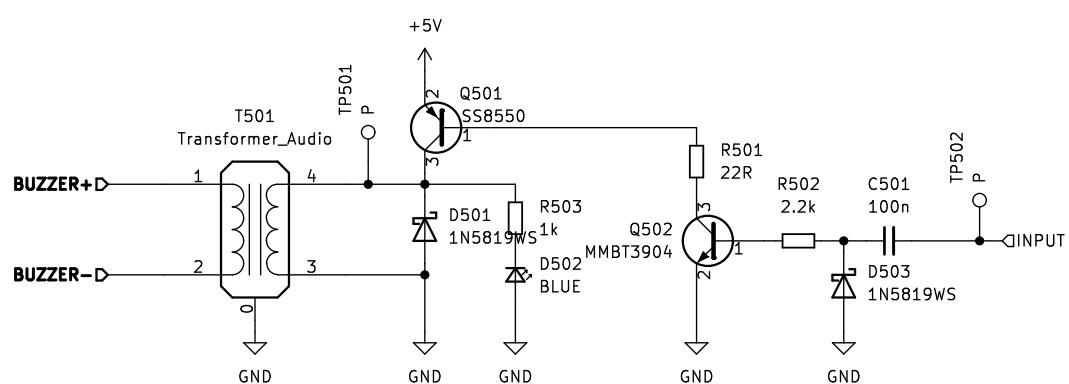
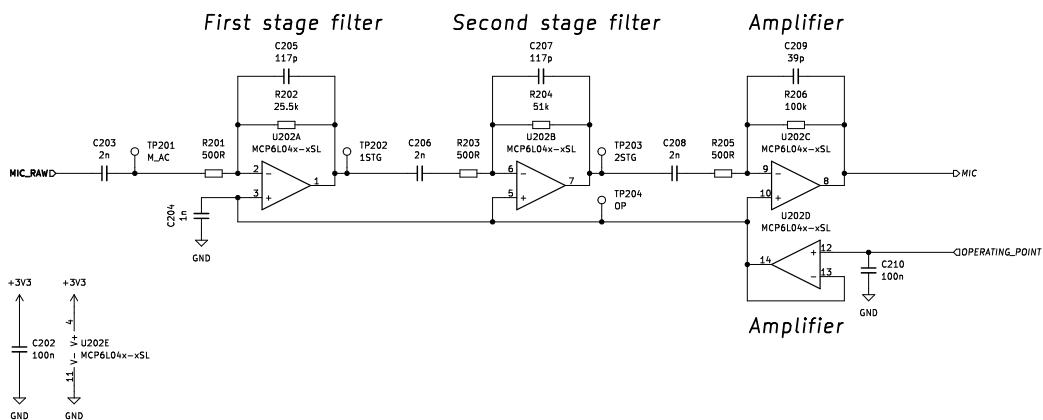
Spis rysunków

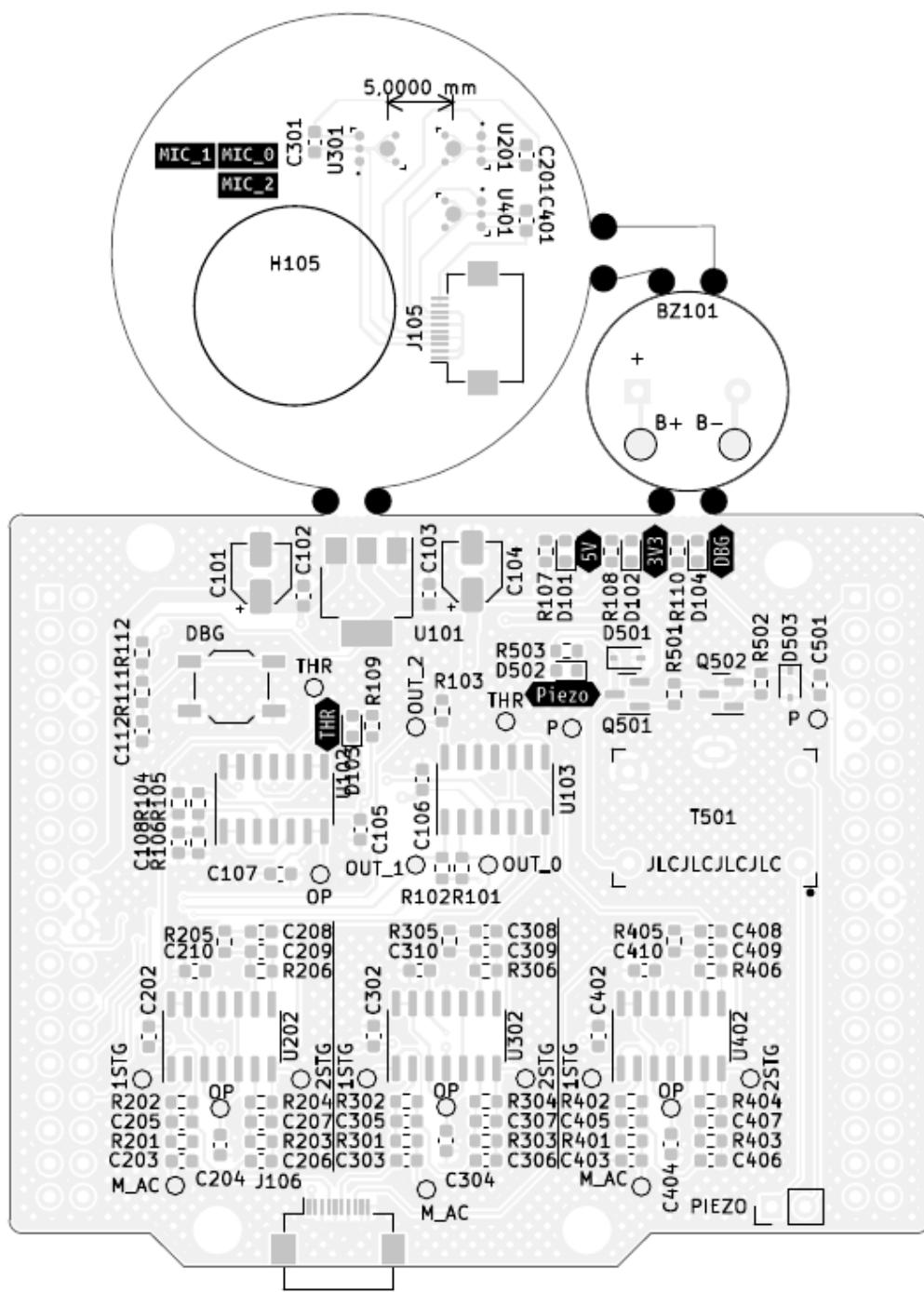
3.1	Pasmo przenoszenia mikrofonu SPU0410LR5H-QB	7
3.2	Mikrofon SPU0410LR5H-QB	7
3.3	TOPOSENS ECHO ONE	8
4.1	rozmieszczenie mikrofonów w przestrzeni trójwymiarowej	10
6.1	Schemat blokowy urządzenia	14
6.2	Ramka danych przychodzących	15
6.3	Ramka danych wychodzących	15
6.4	Stabilizator napięcia	16
6.5	Nadajnik piezoelektryczny	16
6.6	Wzmacniacz sygnału nadajnika piezoelektrycznego	17
6.7	Zestaw filtrów dla sygnału z mikrofonów	18
6.8	Wzmacniacz prądowy napięcia odniesienia	18
6.9	Wzmacniacz wartości progowej	19
6.10	Czterokanałowy komparator	19
6.11	Konfiguracja pinów mikrokontrolera	20
6.12	Konfiguracja zegarów mikrokontrolera	21
7.1	PCB	24
7.2	Moduł nadawczo-odbiorczy	25
7.3	Nakładka na Nucleo	25
7.4	Skończony projekt w otwartej obudowie	26
7.5	Skończony projekt	26
7.6	Widok terminala podczas komunikacji z urządzeniem	27
8.1	Przebieg sygnału odebrany innym przetwornikiem piezoelektrycznym	28
8.2	Przebieg sygnału odebrany innym przetwornikiem piezoelektrycznym, wpływ na odległość	29
8.3	Wyjście transformatora z podłączonym przetwornikiem piezoelektrycznym	29
8.4	Przebieg sygnału odebrany bezpośrednio przez mikrofon MEMS	30
8.5	Przebieg sygnału odebrany bezpośrednio przez mikrofon MEMS	30

Dodatek A

Schematy i noty katalogowe







Do zrobienia

zaktualizować rysunek	17
zaktualizować rysunek procka	19
cite	24
cite	26
Rysunek: screen z oscylo z przebiegiem sygnału z piezo	28
zdjęcie z oscylo z przesuniętym sygnałem i kilka testów na różne odległości	28
Rysunek: screen z oscylo z przebiegiem sygnału z piezo	29
???	29
podać ile prądu ciągnie	29